

УДК 539. 213. 612. 17. 533
DOI 10.17073/1997-308X-2015-1-38-48

Применение сильноточных импульсных электронных пучков для модифицирования поверхности лопаток газотурбинных двигателей

Обзор

© 2015 г. **В.А. Шулов, А.Н. Громов, Д.А. Теряев, В. И. Энгелько**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ)

ОАО «Московское машиностроительное предприятие им. В.В. Чернышева» (ММП)

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, г. Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 20.05.14 г., доработана 30.01.15 г., подписана в печать 02.02.15 г.

Шулов В.А. – докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов МАИ (125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4). Тел.: (499) 158-44-24. E-mail: shulovva@mail.ru.

Громов А.Н. – техн. директор ОАО «ММП им. В.В. Чернышева» (125362, г. Москва, ул. Вишневая, 7). Тел.: (495) 491-56-22. E-mail: zavod@avia500.ru.

Теряев Д.А. – канд. техн. наук, ассистент той же кафедры МАИ. Тел.: (499) 158-44-24. E-mail: teryaev@mail.ru.

Энгелько В.И. – зам. ген. директора НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (189631, г. Санкт-Петербург, Металлострой, дорога на Металлострой, 1). Тел.: (812) 462-78-45. E-mail: engelko@niiefa.spb.ru.

Проанализированы экспериментальные данные о влиянии облучения сильноточными импульсными электронными пучками (СИЭП) на физико-химическое состояние поверхностных слоев и эксплуатационные свойства лопаток газотурбинных двигателей из жаропрочных материалов. Показано, что СИЭП микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для модифицирования поверхности лопаток турбины и компрессора, обеспечивающим проведение высокоскоростной термообработки (закалки), перекристаллизации материала в поверхностных слоях 20–30 мкм, очистки и выравнивания поверхности. Эти процессы обуславливают увеличение усталостной прочности лопаток (на 10–30 %), жаростойкости (в 2–3 раза), сопротивления солевой коррозии (до 6 раз).

Ключевые слова: электронно-пучковая обработка, лопатки компрессора и турбины, сканирующая электронная микроскопия, эксплуатационные свойства.

The experimental data on the influence of irradiation by heavy-current pulsed beams (HPEBs) on physicochemical state of surface layers and operational properties of gas-turbine engines made of heat-resistant materials are analyzed. It is shown that the HPEB of the microsecond duration is a highly efficient tool for modifying the surface of blades of the turbine and compressor, which provides the performance of high-speed thermal treatment (quenching), material recrystallization in surface layers of 20–30 μm, and surface cleaning and smoothing. These processes cause an increase in fatigue strength of blades (by 10–30 %), heat resistance (by a factor of 2–3), and resistance against salt corrosion (up to sixfold).

Keywords: electron-beam treatment, compressor and turbine blades, scanning electron microscopy, service properties.

Введение

Разработка и внедрение новых технологий для повышения долговечности и надежности лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) являются одной из важнейших проблем авиационного двигателестроения [1]. Именно турбинные и компрессорные лопатки, изготавливаемые из жаропрочных никелевых сплавов и сталей, как наиболее нагруженные компоненты двигателя определяют ресурс и надежность эксплуатации

всего изделия. Электронно-лучевая обработка может быть отнесена к наиболее прогрессивным методам модификации поверхности различных деталей. Использование широкоапертурных электронных пучков позволяет осуществлять модифицирование химического и фазового составов тонких поверхностных слоев, а также изменять морфологию поверхности и структуру приповерхностных областей [2]. В процессе об-

работки меняется шероховатость поверхности, происходят оплавление и удаление материала поверхностных слоев за счет испарения, сублимации, абляции и плазмообразования [3].

В этой связи цель настоящей публикации — критический анализ результатов исследований, посвященных разработке основ технологических процессов модифицирования поверхности лопаток компрессора и турбины из жаропрочных сплавов с применением сильнооточного импульсного электронного пучка (СИЭП), формируемого в ускорителе «Геза-ММП» [4, 5].

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования использовались лопатки турбины двигателя РД-33 и образцы из сплава ЖС26НК (мас. %: основа — Ni; 1,0 Ti; 5,6 Cr; 6,2 Al; 1,4 Mo; 10,0 Co; 1,2 V; 1,4 Nb; 12,5 W; 0,18 C; < 0,1 O, N; < 0,02 H; < 0,015 B; термообработка образцов и лопаток: отжиг при $t = 1250$ °С в вакууме в течение 3 ч, охлаждение со скоростью 50—60 град/мин, стабилизирующий отжиг при $t = 1000$ °С в вакууме длительностью 2 ч) с покрытием СДП-2 (мас. %: основа — Ni; 18—22 Cr 11,0—13,5 Al; 0,3—0,6 Y) толщиной 60 мкм, нанесенным на установке МАП-1 по методике ВИАМ (г. Москва) [6].

Кроме того, были исследованы лопатки компрессора двигателя РД-33 из стали ЭП866Ш ферритного класса с карбидным упрочнением (15X16K5H2MВФАВ-ш по ТУ14-1-2756-79), химический состав (мас. %) и режимы термообработки которых были следующие: основа — Fe; 1,7 Ni; 0,13 C; 15 Cr; 1,35 Mo; 4,5 Co; 0,6 Mn; 0,18 V; 0,2 Nb; 0,6 Si; 0,03 N; 0,02 S; 0,03 P; 0,65 W; закалка в струе аргона от 1100 °С; отпуск при $t = 700$ °С в течение 2,5 ч; отпуск при $t = 650$ °С, 2,5 ч. Технологический процесс изготовления лопаток компрессора из этой стали хорошо освоен в ОАО «ММП им. В.В. Чернышева» (г. Москва) и включает 50 операций, основными из которых являются штамповка, фрезерование, вальцевание, шлифование, полирование, термообработка, виброшлифование и виброглянцевание. Выпускаемые по данной технологии лопатки полностью удовлетворяют требованиям разработчика и обеспечи-



Рис. 1. Внешний вид установки «Геза-ММП»

вают ресурс их эксплуатации в составе двигателя РД-33 в течение более 1000 ч при температурах до 600 °С.

Часть лопаток до облучения разрезали на электроэрозионном станке и исследовали методами электронной Оже-спектроскопии (ЭОС), сканирующей (СЭМ) и просвечивающей (ПЭМ) электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и оптической металлографии. Кроме этого, измеряли микротвердость (H_{μ}) и шероховатость (R_a).

Обработку лопаток СИЭП проводили на ускорителе «Геза-ММП» (энергия электронов $E = 115 \div 125$ кэВ; длительность импульса $\tau = 20 \div 80$ мкс; плотность энергии в пучке $w = 15 \div 90$ Дж/см²; площадь поперечного сечения пучка 50—100 см²; неоднородность плотности энергии по сечению пучка — не более 10 %), внешний вид которого представлен на рис. 1.

Лопатки после облучения также разрезали, а из полученных образцов-свидетелей изготавливали поперечные шлифы, после чего изучали их вышеуказанными методами и определяли толщину и структуру модифицированного слоя в зависимости от плотности энергии и числа импульсов. После облучения мишени подвергали вакуумному отжигу (при $t = 1250$ °С — ЖС26НК и 650 °С — ЭП866Ш в течение 2 ч) для снятия остаточных напряжений и стабилизации структурно-фазового состояния, и весь цикл исследований повторяли. Далее были проведены сравнительные усталостные и коррозионные испытания серийных лопаток, а также лопаток, подвергнутых обработке СИЭП.

Результаты исследования и их обсуждение

Изучение лопаток и образцов из сплава ЖС26НК

Хорошо известно [7], что главным технологическим параметром при проведении процесса облучения СИЭП является плотность энергии (w) в импульсе. С ее ростом в приповерхностных слоях мишеней из жаропрочных никелевых сплавов протекают следующие процессы [7]: испарение органических примесных компонентов, испарение и плавление материала поверхностного слоя, кратерообразование и трещинообразование, плазмообразование и абляция. Эти процессы определяют физико-химическое состояние материала в поверхностном слое облучаемых мишеней, что приводит, в конечном счете, к модификации их свойств.

Влияние режимов облучения на физико-химическое состояние поверхностных слоев лопаток и образцов из жаропрочных никелевых сплавов проиллюстрировано в работах [7–9] и на рис. 2–4. Из приведенных в [7–9] данных можно заключить, что перераспределение химических элементов в перекристаллизованном слое при облучении с низкими плотностями энергии («режим плавления» — $w = 20 \div 22$ Дж/см²) осуществляется строго в соответствии с величинами коэффициентов распределения примесей согласно основным положениям теории направленной кристаллизации: примесь с коэффициентом распределения $K_0 < 1$ оттесняется фронтом кристаллизации к поверхности (хром, углерод, алюминий, кислород), в то время как компоненты с $K_0 > 1$ (молибден, вольфрам, иттрий) должны концентрироваться в зоне границы раздела «перекристаллизованный материал — матричный сплав». Такие же элементы, как железо и кобальт, имеющие коэффициенты распределения, близкие к единице, распределяются достаточно однородно по толщине перекристаллизованного слоя. Этот процесс обычно проявляется при небольших скоростях кристаллизации (несколько см/мин). При обработке СИЭП мы имеем дело с очень высокими скоростями охлаждения ($\sim 10^7$ К/с) и, соответственно, кристаллизации. Для правильной интерпретации зафиксированных в [7–9] методом ЭОС данных необходимо учитывать, что при обычных

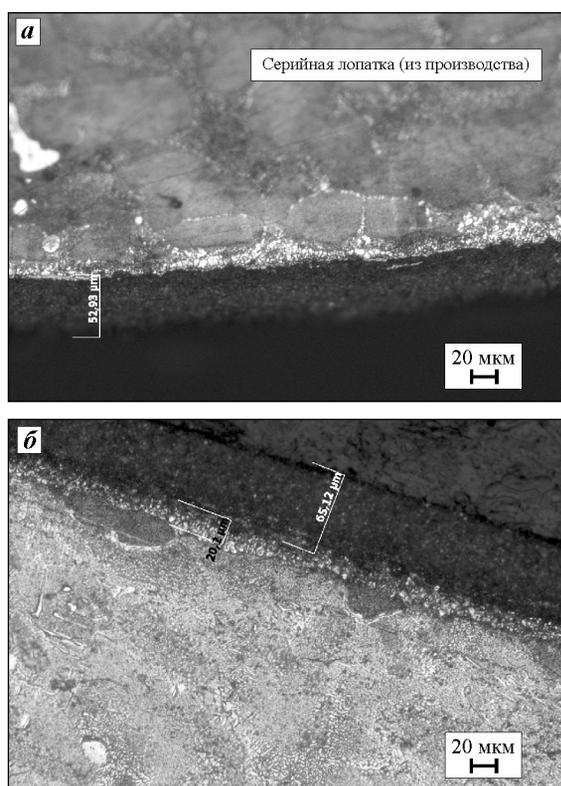


Рис. 2. Микроструктура в поверхностном слое серийных лопаток из сплава ЖС26НК с вакуумно-плазменным NiCrAlY-покрытием до (а) и после (б) облучения СИЭП ($w = 40 \div 42$ Дж/см², $\tau = 40$ мкс) и вакуумного отжига (1250 °С, 2 ч)

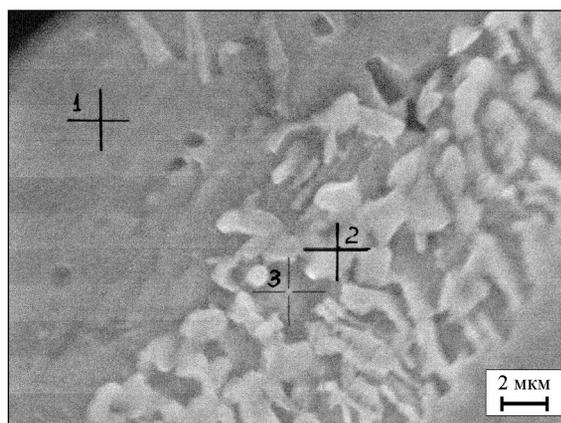


Рис. 3. СЭМ-микроструктура в поверхностном слое серийных лопаток из сплава ЖС26НК с вакуумно-плазменным NiCrAlY-покрытием после облучения СИЭП ($w = 40 \div 42$ Дж/см², $\tau = 40$ мкс) и вакуумного отжига (1250 °С, 2 ч)

направленной кристаллизации и зонной плавке толщина расплавленной зоны (L_m) составляет несколько десятков мм, а при облучении СИЭП диапазон L_m не превышает 20–25 мкм. Поэтому протекание перераспределения элементов при

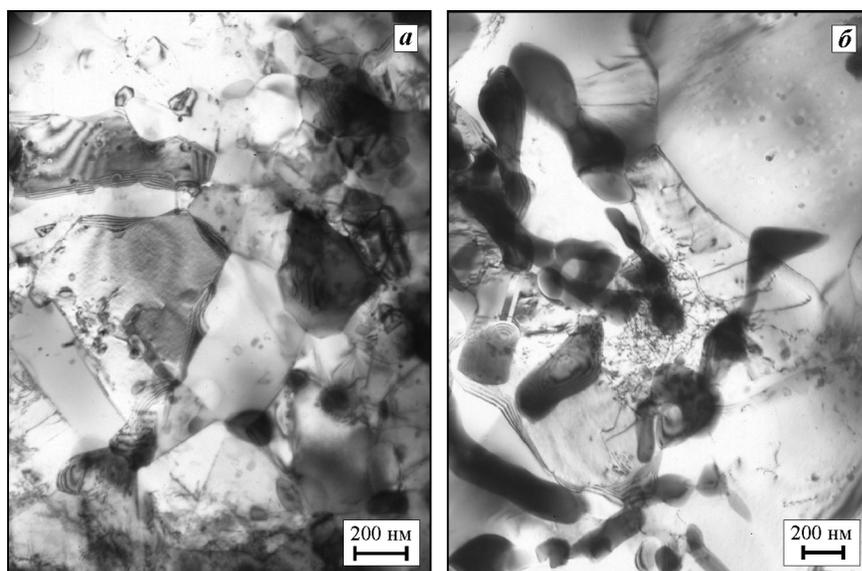


Рис. 4. ПЭМ-микроструктура в поверхностном слое серийных лопаток из сплава ЖС26НК с вакуумно-плазменным NiCrAlY-покрытием до (а) и после (б) облучения СИЭП ($w = 40 \div 42$ Дж/см², $\tau = 40$ мкс) и вакуумного отжига (1250 °С, 2 ч)

кристаллизации материала расплавленной электронным пучком зоны представляется вполне реальным и качественно может быть описано уравнением направленной кристаллизации [7–9].

Конечно, при кристаллизации гетерогенных многокомпонентных никелевых сплавов ситуация будет значительно сложнее. В принципе уравнения направленной кристаллизации [7–9] могут быть использованы только для оценочных расчетов, поскольку при их выводе линии ликвидуса и солидуса на равновесной диаграмме состояния «состав—свойство» аппроксимировались линейными функциями. Последнее справедливо только для левого угла диаграммы состояния «никель — примесный элемент», причем концентрация примеси не должна превышать нескольких десятых или даже сотых долей процента. В этой связи полученные на данном этапе исследования результаты носят скорее качественный, чем количественный характер.

Результаты, представленные в [7–9], позволяют сделать заключение о том, что оптимальные режимы облучения образцов и лопаток из жаропрочных никелевых сплавов с покрытиями NiCrAlY могут быть достигнуты при плотностях энергии $w = 40 \div 42$ Дж/см², когда на поверхности отсутствует явление кратерообразования, сохраняется упрочняющая γ' -фаза, а в поверхностном

слое покрытия увеличивается содержание электронной β -фазы на основе NiAl. Кроме того, при реализации этого режима облучения снижается шероховатость поверхности от $R_a = 2,01 \div 2,12$ до $0,32 \div 0,61$ мкм, а распределение химических элементов по глубине и по поверхности становится однородным.

Обработка СИЭП позволяет частично, а в некоторых случаях и полностью, избавиться от основного недостатка вакуумно-плазменной технологии нанесения защитных покрытий, используемой в авиационной промышленности, — высокой неоднородности физико-химического состояния покрытия из-за нали-

чия капельной фракции в плазме. Присутствие капельной фракции в плазме в процессе осаждения также приводит к снижению адгезии покрытия и формированию относительно высокой пористости, что является основной причиной его деградации и преждевременного разрушения. Многократная перекристаллизация материала покрытия толщиной 15–20 мкм (см. рис. 2–4) обеспечивает получение почти безпористого поверхностного слоя (большие мезопоры в исходном покрытии не могут быть удалены с помощью обработки СИЭП), а формируемые в процессе плавления и кристаллизации термические напряжения могут приводить к отслаиванию покрытия, если система «подложка—покрытие» обладала до облучения низкой адгезией. Таким образом, обработка СИЭП может выступать и в качестве метода контроля качества адгезии покрытия к подложке (рис. 5).

Результаты усталостных испытаний показали, что при оптимальных режимах облучения ($w = 40 \div 42$ Дж/см², $\tau = 40$ мкс) и финишной термообработки (1250 °С, 2 ч) предел выносливости образцов и лопаток из сплава ЖС26НК с покрытием NiCrAlY не снижается по сравнению с деталями, полученными по серийной технологии, а в некоторых случаях может быть даже повышен на 10–20 % [7–9]. Более того, с точки зре-



Рис. 5. Внешний вид лопатки РД-33 из сплава ЖС26НК с вакуумно-плазменным NiCrAlY-покрытием (СДП-2) после облучения СИЭП ($w = 40 \div 42$ Дж/см², $\tau = 40$ мкс)

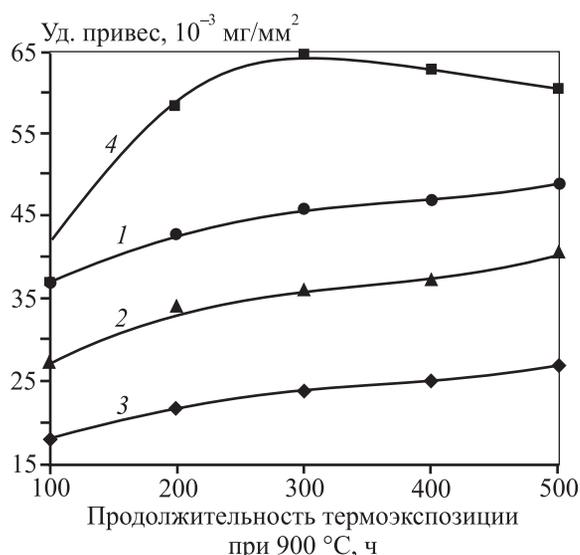


Рис. 6. Кинетические кривые окисления ($t = 900$ °C) образцов из сплава ЖС26НК с вакуумно-плазменным покрытием NiCrAlY (СДП-2), подвергнутых электронно-лучевой обработке ($w = 30 \div 42$ Дж/см², $\tau = 20 \div 40$ мкс) и вакуумному отжигу (1250 °C, 2 ч) w , Дж/см²: 1 – 30, 2 – 35, 3 – 42; 4 – исходное состояние

ния улучшения усталостных свойств это свидетельствует о высокой эффективности обработки СИЭП турбинных лопаток только после проведения финишного отжига. Вакуумный отжиг ($P_{\text{ост}} < 10^{-5}$ мм рт. ст.) облученных СИЭП образцов и лопаток из жаропрочных никелевых сплавов приводит к улучшению усталостных свойств, если продолжительность термообработки составляет 2 ч, а температура термоэкспозиции достигает рабочей температуры 1250 °C.

Результаты испытаний на жаростойкость представлены на рис. 6. Полученные данные позволя-

ют заключить, что электронно-лучевая обработка при $w = 40 \div 42$ Дж/см² и финишная термообработка ($t = 1250$ °C, 2 ч) обеспечивают повышение жаростойкости при 900 °C более чем в 3 раза.

В то же время облучение с низкими плотностями энергии и отсутствие отжига могут привести даже к снижению жаростойкости. Последнее связано с коррозионным растрескиванием, протекающим в покрытии при высокой температуре. Облучение при 40–42 Дж/см² и финишный отжиг способствуют образованию стабильной структуры с оптимальным содержанием β -NiAl-фазы [7–9].

Изучение лопаток компрессора из стали ЭП866Ш

Некоторые результаты исследования влияния режимов облучения на перераспределение химических элементов в тонких поверхностных слоях лопаток компрессора из стали ЭП866Ш приведены в работах [9, 10]. Из полученных данных было сделано заключение о том, что перераспределение элементов при облучении с низкими плотностями энергии («режим плавления» — $w = 20 \div 22$ Дж/см², $\tau = 20$ мкс) осуществляется, как и для лопаток из сплава ЖС26НК, в соответствии с величинами коэффициентов распределения примесей. Примесь с коэффициентом распределения $K_0 < 1$ оттесняется фронтом кристаллизации к поверхности (хром, углерод, кислород), в то время как компоненты с $K_0 > 1$ (молибден, вольфрам) должны концентрироваться в зоне границы раздела «перекристаллизованный материал — матричный сплав». Такие же элементы, как никель и кобальт, имеющие коэффициенты распределения, близкие к единице, распределяются достаточно однородно по толщине перекристаллизованного слоя.

Облучение мишеней СИЭП при повышенных плотностях энергии в импульсе ($w > 24 \div 26$ Дж/см²) приводило, наряду с плавлением материала в поверхностном слое, к формированию на поверхности микрон неоднородностей, имеющих форму кратеров (рис. 7). Были зафиксированы области перекристаллизованного материала с низкой шероховатостью ($R_a \sim 0,1$ мкм), а также отдельные кратеры различной формы и глубины. Химический состав в поверхностных слоях таких перекристаллизованных областей, свободных от

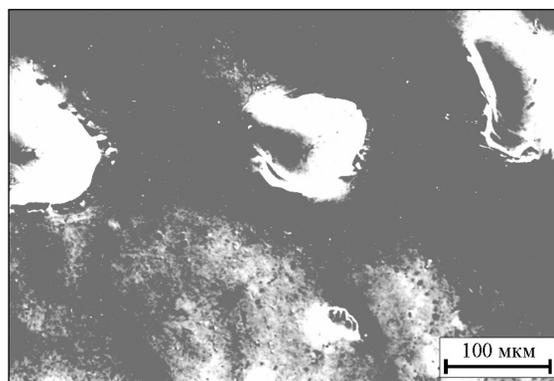


Рис. 7. Поверхность образцов из стали ЭП866Ш после облучения на ускорителе «Геза-ММП»
 $E = 115 \div 120$ кэВ; $n = 3$ имп.; $\tau = 20$ мкс; $w = 32 \div 36$ Дж/см²

кратеров, существенно отличался от элементного состава, фиксируемого с поверхности аналогичных образцов, прошедших обработку «в режиме плавления» [9, 10].

Было показано, что с увеличением плотности энергии в импульсе наблюдалось интенсивное испарение легколетучего хрома. Таким образом, при облучении с плотностью энергии $w > 24 \div 26$ Дж/см² («режим кратерообразования») в приповерхностных областях протекают два параллельно-последовательных процесса, лимитирующих перераспределение элементов: оттеснение примесных компонентов фронтом кристаллизации к поверхности в соответствии с величиной коэффициента распределения и ленгмюровское испарение в вакууме [6].

В этом случае зафиксированные экспериментальные результаты о массопереносе в тонких поверхностных слоях обусловлены:

- выходом на поверхность хрома и углерода и их интенсивным испарением (или сублимацией);
- оттеснением фронтом кристаллизации кислорода, молибдена и вольфрама в матричные слои.

Химический состав в кратерах, формируемых при сильноточном облучении, не может быть предсказан в рамках классических моделей перекристаллизации, что связано с различными механизмами образования этих микронеоднородностей. Результаты изучения химического состава поверхностных слоев образцов, обработанных СИЭП и подвергнутых диффузионному вакуумному отжигу при температуре эксплуатации 650 °С, показали [9, 10], что термообработка приводит к некоторому выравниванию концентраций элементов по глубине, причем их концентрационные профили становятся более однородными, что, скорее всего, объясняется интенсивно протекающими диффузионными процессами.

Анализируя результаты исследования влияния СИЭП-облучения и последующего отжига на химический состав приповерхностных слоев мишеней из стали ЭП866Ш, были сделаны следующие выводы [9, 10]:

- облучение при низких плотностях энергии («режим термообработки» — $w < 20$ Дж/см²) малоэффективно, так как элементный состав поверхностных слоев при этом практически не меняется;
- облучение при $w = 20 \div 22$ Дж/см² («режим плавления») и диффузионный отжиг приводят к увеличению содержания хрома в поверхностных слоях лопаток, более однородному распределению элементов по глубине и очистке поверхности от примесей С и О. Это обеспечивает повышение основных служебных свойств деталей из стали ЭП866Ш, прежде всего сопротивления окислению и солевой коррозии, а также (в меньшей степени) усталостной прочности;
- при $w > 24 \div 26$ Дж/см² («режим кратерообразования») возрастает вероятность фиксации неоднородных концентрационных профилей при ска-

Таблица 1. Влияние СИЭП-облучения на фазовый состав, остаточные напряжения, текстуру и параметр решетки материала поверхностного слоя лопаток и образцов из стали ЭП866Ш (SiK_α-излучение с монохроматором)

Режим облучения		Фазовый состав (текстура)	Остаточные напряжения σ , МПа	Параметр решетки a , нм ($\pm 0,0003$)
w , Дж/см ²	n , имп.			
—	—	$\alpha + Cr_{23}C_6$ (нет)	-520 ± 45	0,2911
18–20	3	$\alpha + Cr_{23}C_6$ (310)	$+310 \pm 90$	0,2927
20–22	1	$\alpha + Cr_{23}C_6$ (нет)	$+250 \pm 40$	0,2925
34–36	1	$\alpha + Cr_{23}C_6$ (310)	$+670 \pm 120$	0,2929
34–36	5	$\alpha + \gamma + Cr_{23}C_6$ (200)	$+1080 \pm 140$	0,2933

Таблица 2. Влияние СИЭП-облучения на шероховатость поверхности лопаток и образцов из стали ЭП866Ш

Режим облучения		R_a , мкм ($\pm 0,01$)
w , Дж/см ²	n , имп.	
—	—	0,17–0,25
15	3	0,15–0,23
15	10	0,15–0,20
20	3	0,10–0,13
20	10	0,10–0,12
26	3	0,15–0,40
26	10	0,27–0,49
32	3	0,98–1,31
36	3	0,52–1,09

нировании электронного зонда по поверхности, что связано с возможностью формирования на ней микрократеров. Последнее крайне нежелательно, поскольку может привести к катастрофическому снижению рабочих характеристик изделий, эксплуатируемых при постоянных и знакопеременных нагрузках в агрессивных средах.

Наиболее важные результаты исследования влияния режимов облучения на фазовый состав и структуру поверхностных слоев лопаток представлены в [9, 10], табл. 1–3 и на рис. 8.

Анализ полученных данных показывает, что:

— в исходных образцах и лопатках поверхностные слои толщиной 20–40 мкм содержат α -фа-

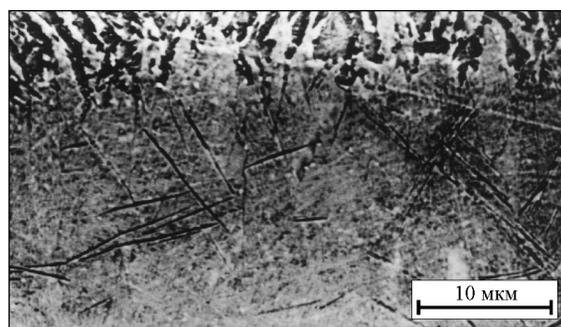


Рис. 8. Микроструктура материала в поверхностном слое лопаток из стали ЭП866Ш после СИЭП-облучения ($w = 26 \div 28$ Дж/см², $n = 3$ имп., $\tau = 20$ мкс)

зу (феррит) и сложные карбиды $(Cr, Me)_{23}C_6$, большое количество микро-, мезо- и даже макропор, а также характеризуются более низкими, чем объемные слои, значениями микротвердости; при этом сформированные остаточные сжимающие напряжения достигают значений $\sigma = -520 \pm 50$ МПа, а плотность дислокаций распределена неоднородно как по поверхности, так и по глубине и изменяется в достаточно широких пределах от 10^9 до 10^{11} см⁻²;

— в облученных мишенях, за счет протекания процесса высокоскоростной перекристаллизации, формируется плохо травящийся поверхностный слой толщиной 20–30 мкм;

— фазовый состав в этом поверхностном слое, в зависимости от плотности вложенной энергии (w) и числа импульсов (n), а именно с их ростом,

Таблица 3. Влияние СИЭП-облучения на микротвердость (H_{μ}) и экзозлектронную эмиссию (I_{eee}) поверхности лопаток из стали ЭП866Ш

№	Режим облучения		H_{μ} , ед. HV				I_{eee} , имп./с	
			(± 30)	(± 25)	(± 20)	(± 20)	Кромка	Спинка
	w , Дж/см ²	n , имп.	$P = 20$ Н	50 Н	100 Н	200 Н		
1	—	—	310	350	370	390	220 \pm 30	150 \pm 20
2	20–22	1	260	350	370	390	250 \pm 30	280 \pm 20
3	20–22	4	255	340	370	390	270 \pm 20	280 \pm 30
4	32–34	4	230	320	370	380	330 \pm 60	370 \pm 80
5	45–48	4	220	300	350	380	400 \pm 70	420 \pm 50
6*	20–22	4	280	300	330	340	100 \pm 10	80 \pm 10
7*	32–34	4	230	290	320	330	130 \pm 10	120 \pm 10
8	20–22	5	250	345	375	385	275 \pm 15	270 \pm 20
9	20–22	7	260	350	370	390	280 \pm 20	290 \pm 30

* После СИЭП-обработки проводился стабилизирующий отжиг.

изменяется в направлении образования остаточного аустенита; кроме того, наблюдаются уширение и смещение рентгеновских линий в сторону малых углов, а также перераспределение интенсивности различных линий, что свидетельствует об увеличении в поверхностном слое плотности дислокаций, формировании остаточных растягивающих напряжений и текстурообразовании;

— после облучения в приповерхностных областях отмечено значительное уменьшение концентрации карбидной фазы, а параметр решетки α -фазы существенно возрастает, что особенно проявляется в образцах, облученных с высокими плотностями энергии несколькими импульсами;

— обработка поверхности мишеней электронным пучком при $w = 20\div 22$ Дж/см² приводит к созданию в поверхностном слое толщиной более 30 мкм развитой дислокационной структуры с большим количеством дислокаций винтовой ориентации, дислокационных переплетений и мелких дислокационных петель, причем дислокационная структура в приповерхностных областях облученных мишеней, в отличие от необработанных пучком образцов, имеет ячеистый или предъячеистый тип, что обычно наблюдается при воздействии импульсного лазерного излучения на стали ферритного класса;

— облучение с низкими значениями плотности энергии в режиме плавления обеспечивает выглаживание поверхности, снижая исходную шероховатость образцов от $R_a = 0,25\div 0,28$ мкм до $R_a = 0,10\div 0,12$ мкм;

— облучение с высокими плотностями энергии $w \geq 24\div 26$ Дж/см² сопровождается формированием поверхностных неоднородностей в форме кратеров диаметром 1—100 мкм и глубиной 0,1—10 мкм, волнообразного микрорельефа поверхности и микротрещин или даже сетки микротрещин с узлами в отдельных кратерах, что может вызывать увеличение шероховатости поверхности до $R_a = 0,85\div 1,15$ мкм;

— уровень остаточных растягивающих напряжений в облученных образцах с ростом w от 20—22 до 34—36 Дж/см² увеличивается от $+250 \pm \pm 40$ МПа до $+1080 \pm 140$ МПа (последнее значение превышает предел прочности материала, что свидетельствует о неприменимости модели плосконапряженного состояния к модифицированным

импульсным электронным пучком мишеням из стали ЭП866Ш);

— зависимости микротвердости (H_{μ}) и интенсивности экзоэлектронной эмиссии ($I_{\text{ее}}$) от плотности энергии в импульсе антибатны: с увеличением значений w микротвердость уменьшается, что обусловлено формированием остаточных растягивающих напряжений и растворением карбидов, а интенсивность экзоэлектронной эмиссии возрастает, подтверждая вывод о высокой чувствительности метода экзоэлектронной эмиссии к процессам фазообразования и дефектообразования.

Полученные на этом этапе данные структурных исследований хорошо согласуются с результатами изучения химического состава мишеней из стали ЭП866Ш, облученных СИЭП, дополняя их и обеспечивая возможность рассмотрения полной картины процессов, протекающих в поверхностном слое при воздействии СИЭП. При низких плотностях энергии $w < 16\div 18$ Дж/см² за время действия импульса от 20 до 30 мкс происходит быстрый нагрев материала поверхностного слоя толщиной, сравнимой с глубиной проникновения электронов (проективный пробег, величина которого для энергии электронов 115—120 кэВ достигает в сталях 15—20 мкм), до температур ниже температуры плавления с последующим высокоскоростным охлаждением за счет теплопроводности («режим термообработки»). В этом случае скорость охлаждения для сталей, согласно результатам расчетов, достигает 10^7 — 10^8 К/с. Электронно-лучевая обработка при таких режимах может приводить к отжигу дефектов, снятию остаточных напряжений, очистке поверхности от органических загрязнений, разложению карбидных или интерметаллидных упрочняющих фазовых конгломератов с последующим их образованием уже на стадии охлаждения и, наконец, к формированию неравновесных структур, характерных для процессов высокоскоростной закалки. Поскольку в поверхностном слое облученных образцов и лопаток возникают остаточные растягивающие напряжения, что может привести к снижению эксплуатационных свойств мишеней, особенно усталостной прочности и сопротивления пылевой эрозии, необходимо осуществить финишную термообработку в вакууме

Таблица 4. Влияние СИЭП-облучения и финишной термообработки на фазовый состав, остаточные напряжения, текстуру и параметр решетки материала поверхностного слоя лопаток и образцов из стали ЭП866Ш (СиК_α-излучение с монохроматором)

Режим облучения		Фазовый состав (текстура)	Остаточные напряжения σ, МПа	Параметр решетки a, нм (±0,0003)
w, Дж/см ²	n, имп.			
—	—	α + Cr ₂₃ C ₆ (нет)	-220±15	0,2911
18–20*	3	α + Cr ₂₃ C ₆ (нет)	-50±20	0,2892
20–22*	1	α + Cr ₂₃ C ₆ (нет)	-70±10	0,2901
34–36*	1	α + Cr ₂₃ C ₆ (нет)	+250±90	0,2914
34–36*	5	α + Cr ₂₃ C ₆ (нет)	+570±110	0,2929

*После СИЭП-обработки проводился стабилизирующий обжиг.

при температурах, близких к температуре второго отпуска исходных заготовок. Такая термообработка, кроме снятия остаточных напряжений, должна стабилизировать структуру материала в поверхностном слое и привести к упрочнению за счет завершения процесса формирования и коагуляции карбидов. С этой целью от образцов и лопаток, подвергнутых облучению, на электроэрозионном станке отрезались образцы-свидетели, которые отжигались в вакуумной печи ULVAK при температуре 650±30 °С в течение 2–6 ч. После завершения отжига весь цикл исследований повторялся для получения информации о завершении релаксационных процессов. Некоторые результаты исследования физико-химического состояния материала поверхностных слоев образцов и лопаток, прошедших электронно-лучевую обработку и стабилизирующий отжиг (отмечено звездочкой), представлены в табл. 4.

Из данных табл. 4 видно, что в процессе отжига в облученных при невысоких плотностях энергии мишенях интенсивно протекают релаксационные процессы отжига дефектов, карбидообразования и снятия остаточных растягивающих напряжений. Кроме того, для таких образцов характерно резкое снижение параметра решетки, что должно привести к упрочнению материала на нанометровом уровне.

Некоторые результаты усталостных испытаний модельных образцов и лопаток компрессора из стали ЭП866Ш приведены в работах [8, 9]. Эти данные, как и опубликованные ранее и посвященные влиянию режимов ионно-лучевой обработки на усталостные свойства металлических деталей, свидетельствуют, с точки зрения повы-

шения их усталостной прочности, о достаточно высокой эффективности электронно-лучевой обработки только после проведения вакуумного отжига [6, 7]. Видно (табл. 5), что вне зависимости от режимов облучения СИЭП-обработка приводит к снижению усталостной прочности жаропрочной стали ЭП866Ш при повышенных температурах. Исходя только из полученных результатов высокочастотных усталостных испытаний можно сделать заключение о том, что эффективность

Таблица 5. Результаты высокочастотных испытаний при t = 600 °С на воздухе образцов (s) и лопаток (b) из стали ЭП866Ш после электронно-лучевой и термической (650 °С) обработок

№	Режим облучения		Мишени	Продолжительность отжига, ч	Усталостная прочность σ ₋₁ , МПа
	w, Дж/см ²	n, имп.			
1	—	—	—	—	328±12
2	20–22	5	s	—	310±10
3	20–22	5	s	6	350±10
4	26–28	5	s	—	295±15
5	26–28	5	s	6	325±10
6	32–36	5	s	—	280±10
7	32–36	5	s	6	305±15
8	—	—	b	—	380±10
9	20–22	4	b	2	390±20
10	20–22	4	b	4	405±10
11	20–22	4	b	6	420±10
12	26–28	1	b	6	290±30
13	26–28	2	b	6	250±30
14	26–28	3	b	6	230±40

электронно-лучевой обработки, с позиций повышения предела выносливости, значительно ниже, чем ионно-лучевой обработки. Наибольший положительный эффект проявляется при облучении с небольшими плотностями энергии $w = 20 \div 22$ Дж/см² и последующем отжиге при $t = 650$ °С в течение 6 ч, когда в поверхностном слое после высокоскоростной кристаллизации завершается процесс формирования и коагуляции карбидов.

Сравнительные коррозионные испытания серийных и обработанных электронными пучками лопаток на жаростойкость проводили при их выдержке при рабочей температуре 600 °С на воздухе в течение 100–500 ч. Для количественной оценки этого эксплуатационного свойства использовали методики регистрации толщины (h_0) окисленного поверхностного слоя и определения удельного изменения массы объектов испытаний. При реализации первой методики из прошедших испытания лопаток вырезали образцы размером 15×7 мм по возможности с наиболее плоской поверхностью, которая была пригодна для изготовления малоуглового косоугольного шлифа. Поверхности приготовленных косых шлифов травилась ионами аргона в камере Оже-спектрометра в течение 30 мин, после чего выполнялся количественный Оже-анализ при регистрации Оже-спектров от точки к точке с шагом 10 мкм. В результате фиксировались не только толщины окисленных поверхностных слоев, но и концентрационные профили всех легирующих компонентов анализируемых материалов и, в частности, максимальные концентрации кислорода в поверхностных слоях. Во втором случае были определены удельные изменения массы исходных и облученных лопаток.

Некоторые результаты проведенных испытаний лопаток компрессора, представленные на рис. 9 и в табл. 6, свидетельствуют о возможности с помощью электронно-лучевой обработки увеличить сопротивление окислению лопаток из стали ЭП866Ш более чем в 2 раза. Анализ данных табл. 6 показывает, что с точки зрения повышения жаростойкости оптимальной плотностью энергии является величина $w = 20 \div 22$ Дж/см², когда количество формируемых кратеров невелико или они отсутствуют. Оптимальное же число импульсов по результатам коррозионных испытаний устано-

Таблица 6. Результаты испытаний на жаростойкость лопаток из стали ЭП866Ш до и после СИЭП-обработки ($E = 115 \div 120$ кэВ; $\tau = 30$ мкс)

Условия испытаний		Режим облучения		Толщина окисленного слоя h_0 , мкм
Время, ч	Температура экспозиции, °С	w , Дж/см ²	n , имп.	
500	600	—	—	45±5
500	600	20–22	5	15±4
500	600	26–28	5	50±5
500	600	32–36	5	55±5
500	600	50–52	5	50±5
500	600	20–22	1	18±4

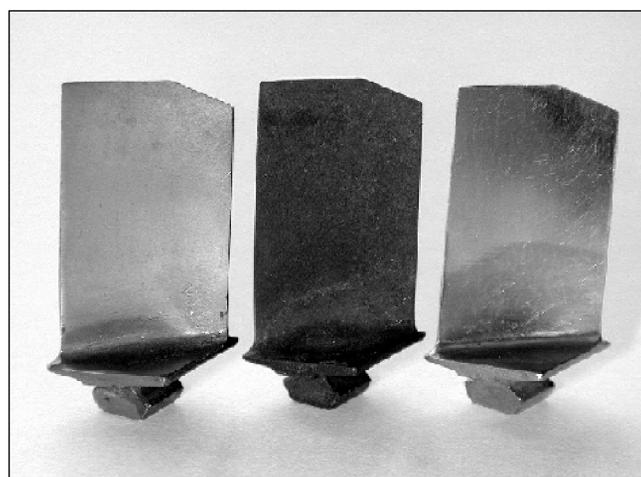


Рис. 9. Внешний вид лопаток из стали ЭП866Ш, прошедших коррозионные испытания в морской воде в условиях термоциклирования. В середине – необлученная лопатка; слева – подвергнутая СИЭП-обработке с $w = 18 \div 22$ Дж/см², $n = 5$ имп.; справа – $w = 23 \div 24$ Дж/см², $n = 5$ имп.

вить не удалось, однако, учитывая данные, полученные при изучении структуры поверхностных слоев лопаток, подвергнутых электронно-лучевой обработке, можно сделать заключение о том, что это число определяется завершением процесса стабилизации физико-химического состояния в приповерхностных областях толщиной 20–25 мкм, т.е. при $n > 4$ имп. Причинами улучшения жаростойкости изделий, обработанных СИЭП, согласно результатам исследования физико-химического состояния поверхностных слоев лопаток до и после облучения и отжига, являются: снижение шероховатости поверхности, формирование защитной пленки на основе оксида хрома, уменьшение параметров решетки и структурная

стабилизация материала в поверхностном слое. С другой стороны, образование кратеров и сетки поверхностных трещин, увеличение содержания дефектов в приповерхностных областях и разложение упрочняющих фаз приводят к заметному снижению жаростойкости. Отсюда вытекают очень жесткие требования к технологическим ускорителям с позиций однородности распределения плотности энергии по сечению пучка и от импульса к импульсу — неоднородность не должна превышать 10 %. Только при достижении такого уровня стабильности работы оборудования можно надеяться на стабильные результаты испытаний, а значит, и надежную эксплуатацию всего изделия.

Заключение

Показано, что сильноточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для контроля адгезии покрытий к подложке и для модифицирования поверхности лопаток турбины из жаропрочных никелевых сплавов с жаростойкими покрытиями.

Установлено, что при облучении в поверхностных слоях лопаток протекают процессы: плавления, перераспределения элементов, кратерообразования, абляции, высокоскоростной кристаллизации из расплава, изменения фазового состава и дислокационной структуры, повышения плотности дислокаций, изменения размеров зерен, формирования остаточных растягивающих или сжимающих напряжений и др.

Показано, что с применением сильноточных импульсных пучков удается повысить усталостную прочность лопаток на 10—30 %, жаростойкость — в 2—3 раза, сопротивление солевой коррозии — до 6 раз.

Работа выполнена по заданию Минобрнауки РФ.

Литература

1. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988.
2. Пайкин А.Г., Львов А.Ф., Шулов В.А. и др. // Пробл. машиностроения и автоматизации. 2003. № 3. С. 41.
3. Белов А.Б., Крайников А.В., Львов А.Ф. и др. // Двигатель. 2006. № 1. С. 6.
4. Белов А.Б., Крайников А.В., Львов А.Ф. и др. // Там же. № 2. С. 8.
5. Шулов В.А., Громов А.Н., Быценко О.А. и др. // Физика и химия обраб. материалов. 2014. № 1. С. 12.
6. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (Сплавы, технология, покрытия). М.: МИСиС, 2001.
7. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Крайников А.В. и др. // Упр. технологии и покрытия. 2009. № 2. С. 37.
8. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А. и др. // Там же. 2010. № 9. С. 22.
9. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Новиков А.С. и др. Сильноточные электронные импульсные пучки для авиационного двигателестроения / Под общ. ред. В.А. Шулова, А.С. Новикова, В.И. Энгелько. М.: Артек, 2012.
10. Шулов В.А., Новиков А.С., Теряев Д.А. и др. // Упр. технологии и покрытия. 2012. № 10. С. 25.